

引用格式: 卢政斌, 孙巍, 韦宁, 等. 芳纶蜂窝芯层对面外局部铺层结构的变形性能[J]. 航空材料学报, 2025, 45(1): 100-110.
LU Zhengbin, SUN Wei, WEI Ning, et al. Deformation performance of aramid honeycomb core layer on partial layup structure outside plane[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(1): 100-110.

芳纶蜂窝芯层对面外局部铺层结构的变形性能

卢政斌*, 孙巍, 韦宁, 刘路, 李琼, 吕秀雷

(连云港中复连众复合材料集团有限公司, 江苏 连云港 222000)

摘要: 在传统正六边形芯格结构的芳纶蜂窝夹层结构共固化成型过程中, 蜂窝对面外局部铺层变化结构的变形配合能力是影响夹层结构件内部成型质量的重要因素。本工作通过建立有限元量化分析模型, 结合典型结构实验验证, 利用全实体建模及弹性力学板弯曲理论, 采用数值方法分析蜂窝在面外的局部变形性能, 探讨蜂窝厚度及外部压力等关键因素对蜂窝变形的影响, 同时验证超蜂窝变形极限的局部型面配合方法。结果表明: 以挠度变形拟合为核心的芳纶蜂窝变形能力量化分析模型, 对蜂窝-铺层结构的匹配状态预测具有较好的适用性。对于蜂窝挠度拟合曲线斜率小于铺层过渡斜率的情况, 蜂窝让位铣切对铺层过渡区的胶接质量提升具有积极影响, 但让位铣切形式的不同不会产生明显的胶接质量差异, 相关结果对于蜂窝夹层结构的结构设计及工艺设计具有一定参考价值。

关键词: 复合材料; 夹层结构; 蜂窝; 变形; 分析模型

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000013

中图分类号: V214.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)01-0100-11

Deformation performance of aramid honeycomb core layer on partial layup structure outside plane

LU Zhengbin*, SUN Wei, WEI Ning, LIU Lu, LI Qiong, LYU Xiulei

(Lianyungang Zhongfu Lianzhong Composites Group Co., Ltd., Lianyungang 222000, Jiangsu, China)

Abstract: In the co-curing process of aramid honeycomb sandwich structures with traditional hexagonal core lattice structures, the deformation compatibility of honeycomb with locally varying structures outside the plane is an important factor affecting the internal forming quality of sandwich structures. This article analyzes the out-of-plane local deformation performance of honeycombs using numerical methods by establishing a finite element quantitative analysis model, combining typical structural experimental verification methods, using full-body modeling and elastic mechanics plate bending theory. It explores the influence of key factors such as honeycomb thickness and external pressure on honeycomb deformation, and verifies the local surface fitting method of super-honeycomb deformation limits. The results show that the quantitative analysis model of aramid honeycomb deformation capability, with deflection deformation fitting as the core, has good applicability for predicting the matching state of honeycomb-layered structures. For cases where the slope of the honeycomb deflection fitting curve is less than the transition slope of the layer, honeycomb yield milling has a positive impact on the bonding quality of the transition region of the layer, but different forms of yield milling do not produce significant differences in bonding quality. The relevant results have certain reference value for structural design and process design of honeycomb sandwich structures.

Key words: composites; sandwich; honeycomb; deformation; analytical modelling

蜂窝夹层结构因具有质量轻、弯曲强度与刚度大、抗失稳能力强等优点, 已大量应用于飞行器结

构零部件, 如发动机短舱^[1]、机身罩、尾翼安定面、雷达罩^[2]及客货舱地板^[3]等, 与其相关的成型工

艺发展也比较迅速^[4]。

在实际应用过程中,因飞行器特殊的气动外形要求,蜂窝夹层结构产品往往具有比较复杂或曲率比较大的曲面外形特征。在此类产品的工艺设计过程中需要着重关注两点:一是需要在蜂窝配合蒙皮曲率外形变化的过程中尽量保证蜂窝芯格结构的完整性及规整性,因为蜂窝芯格的过度挤压变形会导致蜂窝结构失稳,对夹层结构件整体的力学性能产生不利影响^[5-6],因此在传统的正六边形芯格蜂窝基础上,相继开发有拉伸芯格蜂窝、欠拉伸芯格蜂窝以及 Flex-core 蜂窝等柔性芯子,用于适配大曲率或空间曲率(球面)形状赋形^[7],同时还开发有异形结构芯格蜂窝^[8-10]、反手性芯格蜂窝^[11]及多凹角蜂窝^[12]等独特芯子形状与构造来满足某些特殊的性能要求;二是需要蜂窝能够随着结构外形变化与蒙皮达到紧密贴合的效果,确保整体结构的成型质量。

以传统正六边形芯格芳纶蜂窝为研究对象,对其面外变形能力进行了分析。正六边形芯格芳纶蜂窝属于刚性蜂窝,如在较大曲率下赋型,极易出现撕裂、凹陷或压溃^[13]等缺陷,无法满足后续使用的性能要求。目前关于该类芳纶蜂窝的面外变形配合,主要集中在蜂窝对曲率结构整体的变形配合方面,王莹等^[14]、刘顺臻等^[15]通过将曲率蜂窝在变形较大区域进行分割、分块并进行拼接的形式,较好地解决了蜂窝在大尺寸大曲率型面的铺贴问题。众多研究者^[16-19]采用在蜂窝表面开槽的方法对芯格变形进行调控,通过实验或设计开槽参数,使蜂窝芯变形控制满足零件制造精度要求。但是在实际的飞行器结构设计迭代过程中,综合复合材料可设计性强的优点以及飞行器强调减重的需求,往往会根据不同部件在服役环境中的结构强度需求,对夹层结构的细节形式进行适应性设计,根据局部载荷需求进行大量的局部铺层增强或者过渡丢层设计,大幅提升材料的有效载荷比,但是蜂窝配合面蒙皮铺层结构的局部变化会导致配合面出现突起、凹陷或台阶等型面特征,这些特征的“跨度”往往也都比较小,结合芳纶蜂窝弯曲强度与刚度大的材料特点,尤其是有超厚尺寸蜂窝应用的场景,当蒙皮存在局部过渡铺层变化型面时,蜂窝难以与其形成紧密、长期的贴实状态,造成边缘翘起或内部局部内应力过大,从而带来边缘架桥、局部区域弱粘接甚至分层等不可接受缺陷,造成零件报废。目前对于芳纶蜂窝适配局部面外铺层变化结构的变形能力研究鲜见报道。

本工作通过建立六边形蜂窝全实体模型,利用弹性力学板的弯曲理论,以蜂窝面外挠度变形 μ 为关键指标,结合数值分析方法拟合特定载荷下目标蜂窝的挠度变形曲线^[20],建立针对蜂窝面外局部变形能力的量化分析模型,探讨蜂窝厚度及外部压力等关键影响因素对蜂窝变形的影响,同时通过实验验证量化分析模型的有效性。另外,分析在超蜂窝变形极限条件下,蜂窝让位铣切对提高型面配合度的适用性,对于该类蜂窝夹层结构的结构铺层设计和工艺设计具有参考意义。因工艺规范允许范围内的铺层定位误差对整体过渡铺层结构的斜率变化影响很小,本工作未予考虑。

1 仿真与实验

1.1 仿真分析

目前,蜂窝结构的有限元模型建立方法主要包含全实体建模及等效建模两种方法^[21-23],全实体建模对于单块蜂窝的精细结构变形分析具有较好的适用性,因此本工作采用全实体建模方法进行有限元本构模型建立。芳纶纸蜂窝由芳纶纸经过 L 向的间隔粘接,再沿 W 向拉伸形成均匀的蜂窝块材,将芳纶纸看成是均匀的片材,简化为均质材料,用板壳单元来模拟芳纶蜂窝。由于 L 方向是条带方向,为粘接面,故与 L 方向平行的区域为双层厚度,与 L 向不平行的区域为单层厚度,蜂窝模型简化为节点与单元组成的格栅结构,如图 1 所示。模型使用的芳纶纸力学性能参数依据 Seemann 等^[24]的研究数据,数据见表 1。

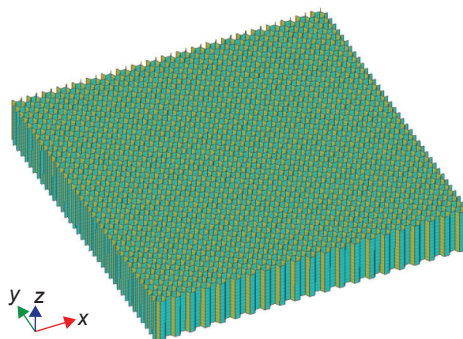


图 1 正六边形芯格芳纶蜂窝模型

Fig. 1 Model of hexagonal core lattice aramid honeycomb

1.1.1 蜂窝芯层面外变形量化分析模型

建立长 350 mm、宽 350 mm 的蜂窝方边板模型,蜂窝四面网格节点自由度定义为固定约束,在蜂窝表面施加均布压力。针对蜂窝变形结果,分别

表 1 芳纶纸力学性能参数
Table 1 Mechanical performance parameters of aramid paper

Parameters	Value
Longitudinal Young's modulus, E_1/MPa	5000
Transverse Young's modulus, E_2/MPa	4000
Poisson's ratio, $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$	0.2
Shear modulus, $G_{12}, G_{13}, G_{23}/\text{MPa}$	1450
Longitudinal tensile strength, X_t/MPa	90
Longitudinal compressive strength, X_c/MPa	105
Transverse tensile strength, Y_t/MPa	60
Transverse compressive strength, Y_c/MPa	90
Tensile strength in the direction of the paper thickness, Z_t/MPa	60
Compressive strength in the direction of the paper thickness, Z_c/MPa	90
In-plane shear strength, S/MPa	44
Material density, $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1100

提取蜂窝非承载面几何中心 x 方向(蜂窝 L 向)和几何中心 y 方向(蜂窝 W 向)上各个芯格节点在 z 轴方向的位移量, 将此位移变形量定义为该节点的挠度变形量 μ , 见图 2, 使用数值分析方法对提取

的挠度变形量 μ 在 x 轴和 y 轴坐标上进行曲线拟合, 以拟合曲线的曲率结构特征趋势线为该结构蜂窝对面外局部铺层结构变化的理论极限变形容差。

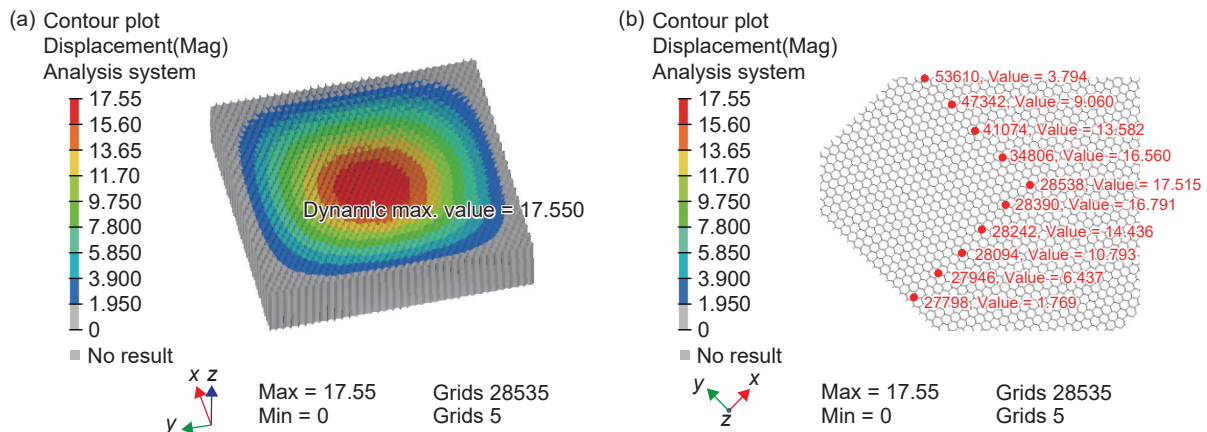


图 2 变形分析及挠度变形量提取方式 (a)变形分布云图; (b)蜂窝各节点挠度变形

Fig. 2 Deformation analysis and extraction of deflection deformation amount

(a)deformation distribution contour map; (b)deflection of each node of the honeycomb

1.1.2 蜂窝芯层对凸台结构的受力传导分析

建立长 800 mm、宽 800 mm 的蜂窝芯模型, 厚度 70 mm, 四周边缘倒角 22° , 表面施加 0.3 MPa 压力, 分析蜂窝下表面与底部平面的接触面压力分布, 此数据作为原始对照组。另外, 依据典型的蒙皮局部增强铺层结构外形, 设计底面平台, 平台中心有 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的 2 mm 高凸台, 凸台边缘设计过渡斜坡, 斜坡斜率为 0.04 (1:25, 此斜率是较

为常见的铺层过渡斜率设计值), 见图 3, 分析在额定外部压力下, 蜂窝下表面与底部平台的接触面压力分布。

1.2 实验方法

蜂窝夹层结构复合材料件采用热压罐共固化成型工艺制造。设计典型蜂窝夹层结构实验件, 如图 4 所示, 蜂窝选用 ACT2 航空级芳纶纸蜂窝芯, 正六边形孔格, 孔格边长 3.2 mm, 蜂窝上下表面设

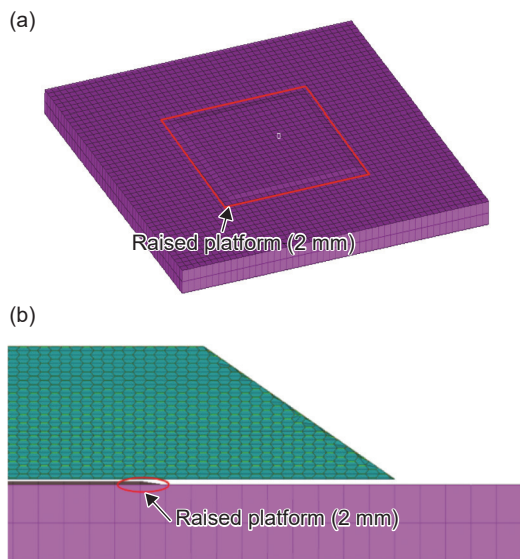


图 3 凸台结构设计及蜂窝初始配合状态 (a)凸台设计; (b)蜂窝和凸台配合状态

Fig. 3 Structure design of raised platform and initial fitting state of the honeycomb (a)design of raised platform; (b)fitting state of the honeycomb and raised platform

计有整铺层结构胶膜, 蜂窝上下蒙皮分别由 6 层 T300 级碳纤维平纹织物预浸料层叠而成, 上下蒙皮之间设计 3 层边缘填充层, 蜂窝下蒙皮贴蜂窝面

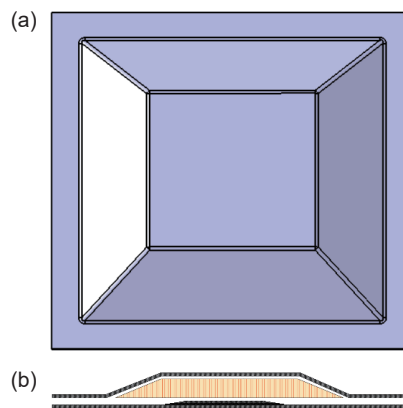


图 4 典型蜂窝夹层结构试验件示意图 (a)主视图; (b)截面图

Fig. 4 Typical honeycomb sandwich structure test piece diagram (a)main view; (b)cross-sectional view

设计局部加强层, 加强层高度由局部铺层数决定, 最大加强层尺寸 400 mm×400 mm, 设计铺层过渡斜率为 0.04(1:25), 层板尺寸为 1000 mm×1000 mm, 蜂窝尺寸 800 mm×800 mm。

1.2.1 原材料

在蜂窝局部变形能力分析实验中, 所使用的主要原材料信息见表 2, 其中芳纶蜂窝为标准的 3.175 mm (1/8 英寸) 正六边形芯格结构。

表 2 实验材料
Table 2 Experimental materials

Material name	Grade	Density	Vendor	Remark
Prepreg	COM970/P WC T300 3K ST	193 g/m ²	Cytec	
Adhesive film	Loctite EA7000	244 g/m ²	Henkel	
Aramid honeycomb	ACT2-3.2-48	48 kg/m ³	ACT	The length of the edge of the core. 3.2 mm

1.2.2 制造工艺

夹层实验件整体结构采用热压罐共固化成型工艺制造, 在有焊接固定金属抓紧带的平板工装上, 手工铺叠预裁剪配套的织物预浸料, 预浸料铺叠位置使用激光投影线辅助定位, 每铺叠 3~5 层封临时真空袋, 真空压实, 其中, 蜂窝层及胶膜层进行额外压实操作, 铺叠完成后, 封真空袋, 在热压罐中以 2 °C/min, 加热至 180 °C。零件在 (180±5) °C 下保温至少 2 h, 成型压力 (0.31±0.034) MPa, 真空袋内固化全程通大气。

1.2.3 实验矩阵

依据表 3 中实验矩阵的变量参数进行典型结构工艺实验。

其中, 实验 1 和实验 2 分析了同等局部铺层高度下, 不同外部压力对同等厚度蜂窝的屈服变形状

态, 实验 3 为对照组, 实验 4 至实验 6 验证了在超蜂窝变形极限条件下, 蜂窝让位铣切对提高型面配合的积极影响。实验 4 中, 未对蜂窝底面配合位置

表 3 工艺实验矩阵
Table 3 Process experiment matrix

No.	Variable			Structure dispose
	Pressure/MPa	Thickness/mm	Local ply height/mm	
1	0.03	70	1.8	
2	0.095	70	1.8	
3	0.3	70	0	Planar fit
4	0.3	70	2.8	Planar fit
5	0.3	70	2.8	Bevel fit
6	0.3	70	2.8	Step fit

进行结构铣切,仍保留原始的平面配合结构,实验 5 中,根据下蒙皮局部加强层位置在蜂窝底面配合区进行斜面让位铣切,斜面斜率与铺层设计斜率一致。实验 6 中,根据下蒙皮局部加强层位置在蜂窝底面配合区进行阶梯让位铣切,阶梯位置与实际的铺层台阶相一致。配合结构形式如图 5 所示。

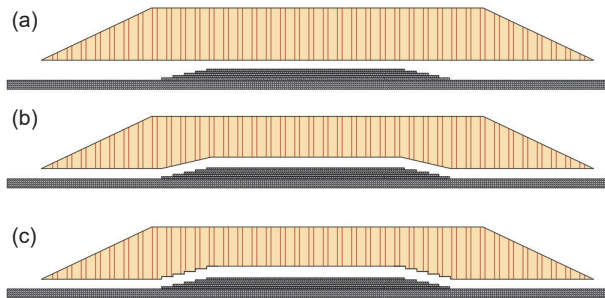


图 5 蜂窝底面对局部加强层的配合形式示意
(a)平面配合; (b)斜面配合; (c)阶梯配合

Fig. 5 Schematic diagram of cooperation form of honeycomb bottom surface with local reinforcement layer
(a)planar fit; (b)bevel fit; (c)step fit

2 结果与讨论

2.1 不同厚度蜂窝的变形性能分析

以厚度为 25、40、70 mm 的芳纶蜂窝为研究对象,分析不同厚度蜂窝在 0.1 MPa 外部压力下的变形能力,分析结果如图 6 所示,其中 70 mm 蜂窝中心位置最大变形约为 5.85 mm,各个状态下挠度变形量 μ 的拟合曲线如图 7 所示,因蜂窝结构在 L 向和 W 向的结构形式及面外变形行为存在差别,故分别在 L 和 W 两个方向上进行变形量拟合。

图 7 中,在 0.1 MPa 外部压力下,蜂窝厚度为 25 mm 时,蜂窝 L 向拟合曲线的斜率为 0.73, W 向拟合曲线的斜率为 0.75, W 向变形能力更优, L 向比 W 向斜率大 0.02; 因材料几何惯性矩与材料厚度的平方成正比,蜂窝厚度越大其面外变形能力越弱,对于 40 mm 以上厚度的蜂窝其两个方向上的斜率大致相当,蜂窝厚度为 40 mm 时,蜂窝 L 和 W 向拟合曲线的斜率为 0.19 左右; 蜂窝厚度为 70 mm 时,蜂窝 L 和 W 向拟合曲线的趋势线斜率为 0.036 左右,表明该结构下,蜂窝对局部铺层变化斜率的理论最大容差是 0.036,如典型结构样件中设计的局部铺层过渡斜率为 0.04,其略大于蜂窝理论变形斜率,考虑分析模型的简化定义,该蜂窝-蒙皮配合结构在 0.1 MPa 下,蜂窝与局部铺层的配合界面可能存在弱粘接及分层的风险。

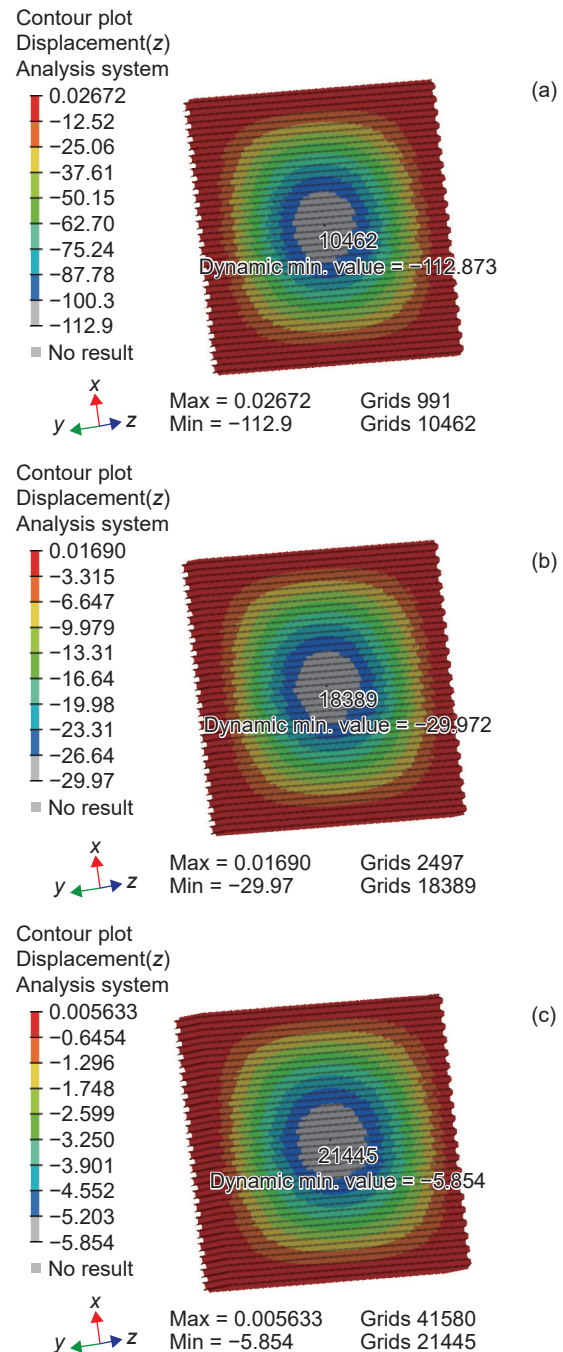


图 6 在 0.1MPa 压力下不同厚度蜂窝变形分布云图
(a)25 mm; (b)40 mm; (c)70 mm

Fig. 6 Cloud map of deformation distribution of honeycomb with different thickness under 0.1 MPa
(a)25 mm; (b)40 mm; (c)70 mm

2.2 不同外部压力下蜂窝变形性能

以 70 mm 标准厚度的芳纶蜂窝为研究对象,分析该厚度蜂窝在外部压力分别为 0.03、0.1、0.3 MPa 下的变形能力,变形分布云图如图 8 所示,在同等蜂窝厚度下,外部压力越大其面外变形量越大。

蜂窝变形在 L 和 W 向的挠度拟合曲线见图 9。以蜂窝 L 向为例,如图 9(a)所示,0.03 MPa 是一般蜂窝夹层结构在铺叠过程中的工艺规范推荐

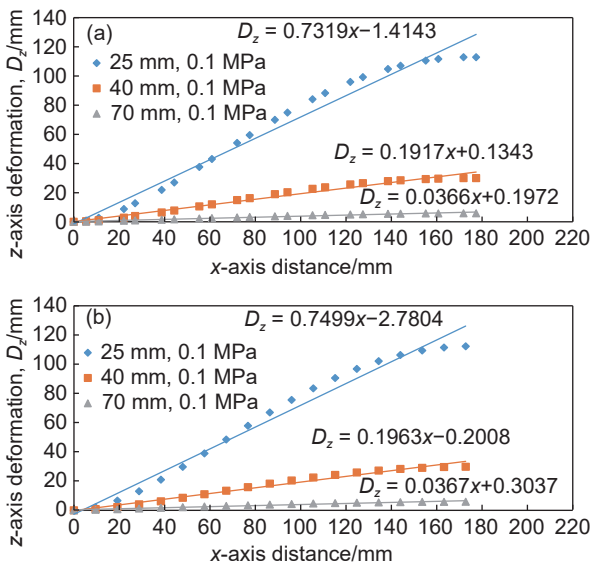


图 7 蜂窝变形在 L 和 W 向的挠度拟合曲线
(a)L 向; (b)W 向

Fig. 7 Fitting curve of honeycomb deformation deflection in L and W directions (a)L direction; (b)W direction

的压实压力, 70 mm 蜂窝在 0.03 MPa 外部压力下, 拟合挠度变形曲线的斜率为 0.011, 远小于典型结构样件中设计的局部铺层过渡斜率 0.04, 表明该压力无法达到预期的压实效果; 0.1 MPa 是理论真空度极限, 是常规铺叠过程中, 可以施加给蜂窝夹层结构的理论最大压力, 70 mm 蜂窝在 0.1 MPa 外部压力下, 拟合挠度变形曲线的斜率为 0.0366, 略小于典型结构样件的局部铺层设计过渡斜率 0.04, 表明该压力下蜂窝与局部铺层结构的配合, 可能存在风险; 0.3 MPa 是一般蜂窝夹层结构的工艺规范推荐固化压力, 70 mm 蜂窝在 0.3 MPa 外部压力下, 拟合挠度变形曲线的斜率为 0.1098, 远大于典型结构样件的局部铺层设计过渡斜率 0.04. W 向的规律与 L 向一致, 表明该成型压力下蜂窝与局部铺层结构可以达到较好的固化层合结果。

2.3 蜂窝芯层压力传导分析结果

依据 1.1.2 节的建模分析思路, 分别探讨了外部额定压力为 0.3、0.1、0.03 MPa 下, 蜂窝芯层对凸台结构的压力传导分布, 接触面压力分布云图如图 10 所示。

由图 10(a)可见, 0.3 MPa 下, 外部压力经蜂窝对平面底板的压力传导是均匀的, 接触面压力在 128 N 左右; 而在带有凸台结构的底板上, 凸台的上棱边所受的压力最大, 应力集中较为明显, 凸台的两侧边缘压力呈现先减后增的趋势, 其中凸台的外部边缘存在明显的欠压区, 随着外部压力减小, 欠压区的范围逐步增大; 由图 10(d)可见, 当外部压

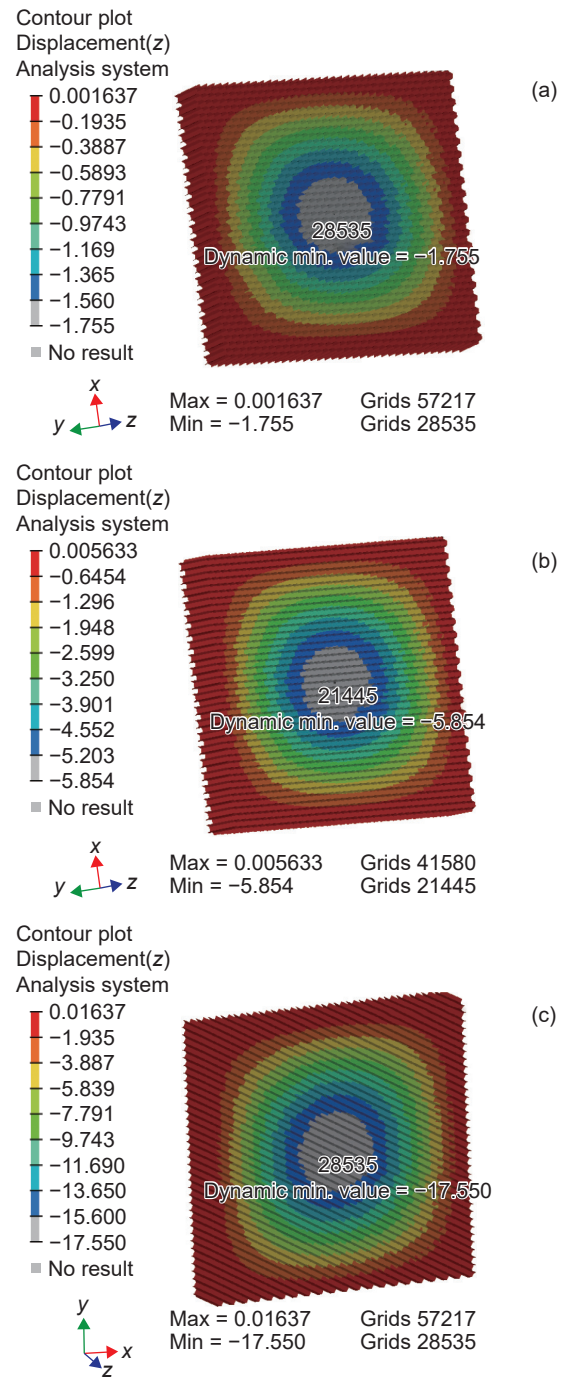


图 8 70 mm 厚度蜂窝在不同压力下的变形分布云图
(a)0.03 MPa; (b)0.1 MPa; (c)0.3 MPa

Fig. 8 Deformation distribution cloud map of honeycomb with thickness of 70 mm under different pressures
(a) 0.03 MPa; (b) 0.1 MPa; (c) 0.3 MPa

力降至 0.03 MPa, 凸台四角存在明显应力集中, 除平台棱边及蜂窝边缘, 其余绝大部分区域的接触应力水平极低, 难以形成有效接触。

图 11 为蜂窝几何中心轴 L 向的接触面压力分布曲线。图 11(a)为接触应力的提取方式示意, 横坐标为中心轴距离坐标, 箭头方向为横坐标方向, 横坐标 200 mm 和 600 mm 处为预设的凸台边缘,

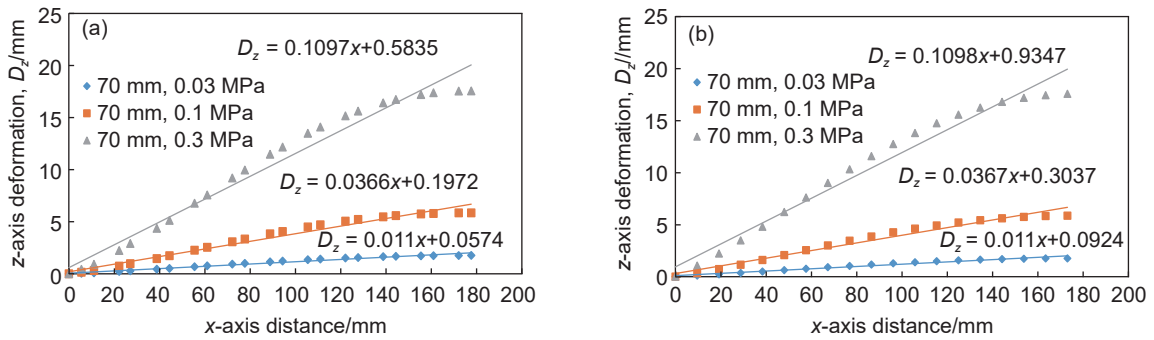


图 9 蜂窝变形在 L 和 W 向的挠度拟合曲线 (a)L 向; (b)W 向

Fig. 9 Fitting curve of honeycomb deformation deflection in L and W directions (a)L direction; (b)W direction

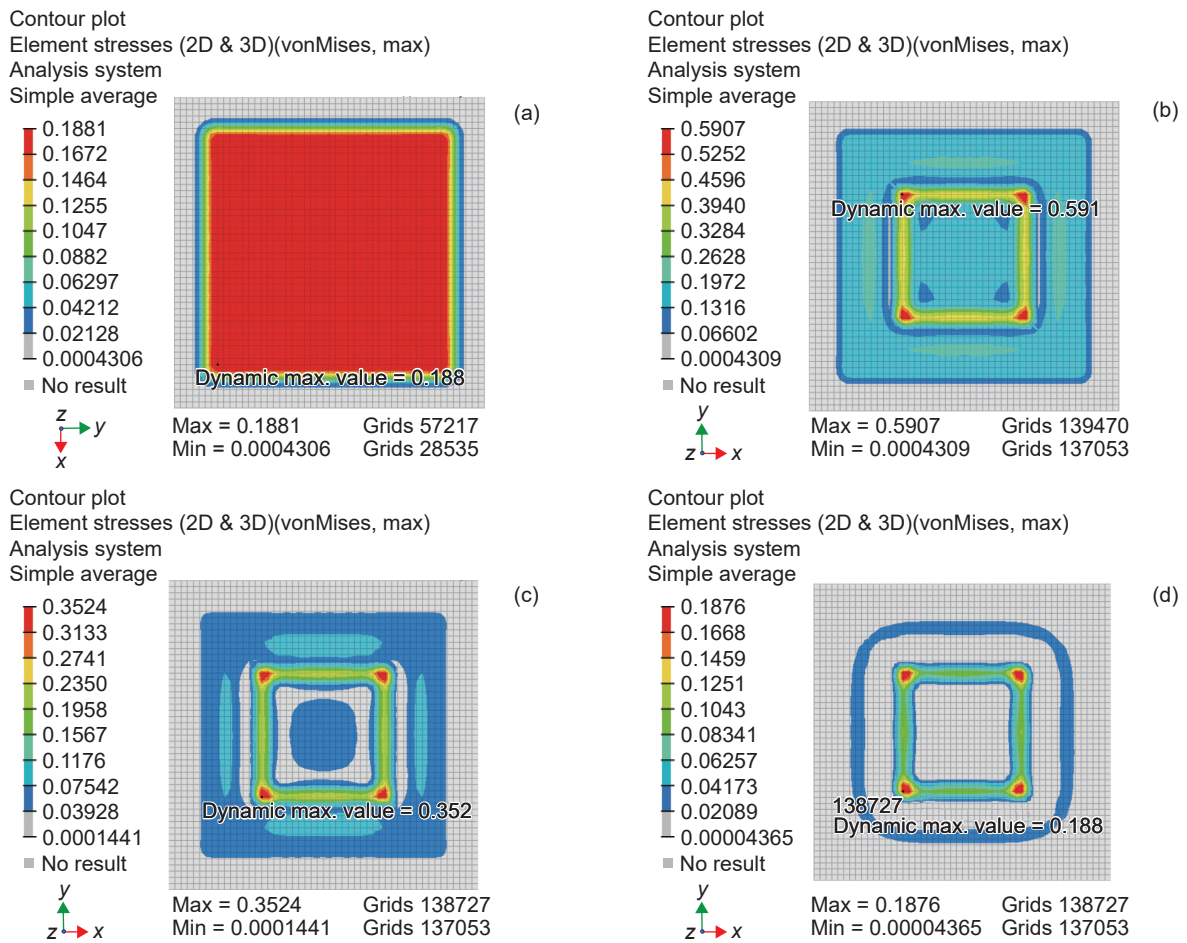


图 10 不同压力下凸台结构的应力分布 (a)0.3 MPa 压力下的蜂窝(平面); (b)0.3 MPa 压力下的蜂窝(凸台); (c)0.1 MPa 压力下的蜂窝(凸台); (d)0.03 MPa 压力下的蜂窝(凸台)

Fig. 10 Stress distribution of the raised platform structure under different pressures (a)0.3 MPa on honeycomb(plane); (b)0.3 MPa on honeycomb(raised platform); (c)0.1 MPa on honeycomb(raised platform); (d)0.03 MPa on honeycomb(raised platform)

200~600 mm 为凸台的上顶面。图 11(b)中, 0.3 MPa 下, 蜂窝在上棱边外部边缘存在零压点接触, 蜂窝在外部边缘及凸台顶面仍保持有较高水平的面接触压力; 图 11(d)中, 外部压力为 0.03 MPa 时, 凸台外边缘坐标 100~175 mm 及 625~700 mm 处压力趋于 0, 凸台上顶面 250~300 mm 及 500~550 mm 处压力也趋于 0, 凸台中心最大仅为 12 N

左右, 外部压力下, 蜂窝跨越凸台上棱边形成“弓”形接触, 仅在距蜂窝外部边缘 100 mm 范围内保持低水平的应力接触, 外部压力移除后, 蜂窝回弹翘边风险极高。

2.4 典型结构样件实验

根据 1.2.3 节实验矩阵设计, 对有限元分析模型的有效性进行验证, 典型样件实验 1 结果如图

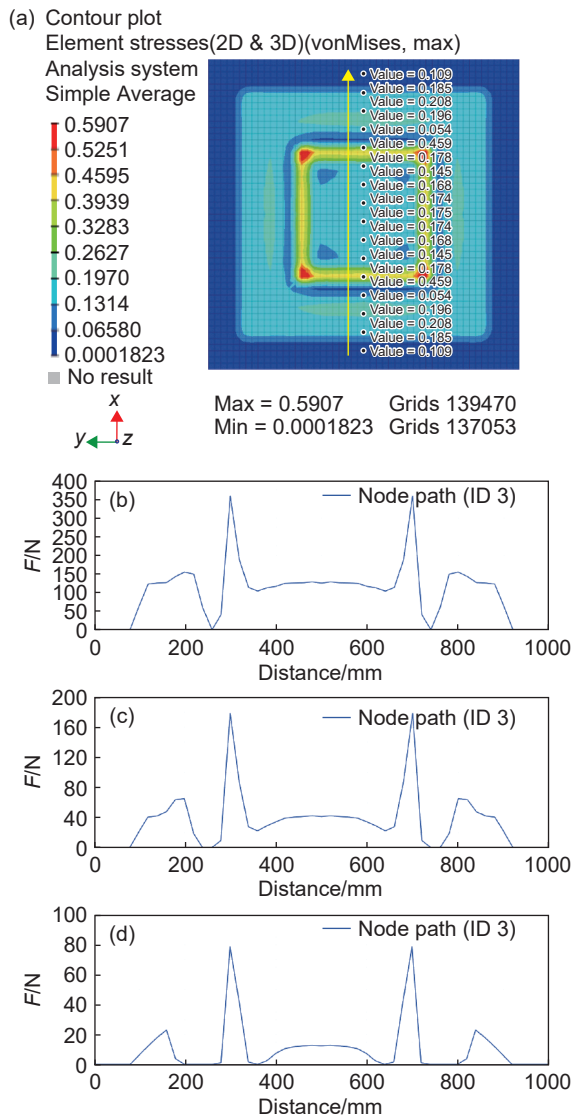


图 11 蜂窝几何中心轴 L 向的接触面压力分布曲线 (a)接触面上蜂窝几何中心轴压力值提取; (b)0.3 MPa 下中心轴上的压力值; (c)0.1 MPa 下中心轴上的压力值; (d)0.03 MPa 下中心轴上的压力值

Fig. 11 Pressure distribution curve of the contact surface of the honeycomb L-axis to the geometric center axis (a)pressure value method of contact surface central axis; (b)pressure value of central axis under 0.3 MPa; (c)pressure value of central axis under 0.1 MPa; (d)pressure value of central axis under 0.03 MPa

12 所示。结果表明,使用真空压力 0.03 MPa 压实 70 mm 蜂窝过程中外观面可基本随型,但是真空卸载后蜂窝会立即沿 L 向在蜂窝两端弹起翘边,变形幅度较大,中心区域完全无法贴实在铺层上,导致后续产生边缘铺层架桥,与分析模型的预测结果一致。

典型样件实验 2 结果如图 13 所示,使用真空压力 0.095 MPa 压实 70 mm 蜂窝过程中外观面可基本随型,但是真空卸载后蜂窝会在保持 30 min 左右之后,沿 L 向在两端产生轻微回弹分离,但回

弹量相对较小,对铺层过程无决定性影响,手工辅助压实可完成铺叠,虽在后续成品无损检测过程中亦未发现边缘铺层架桥缺陷,从生产过程控制角度来看,仍考虑超出临界控制状态,与分析模型的预测结果一致。

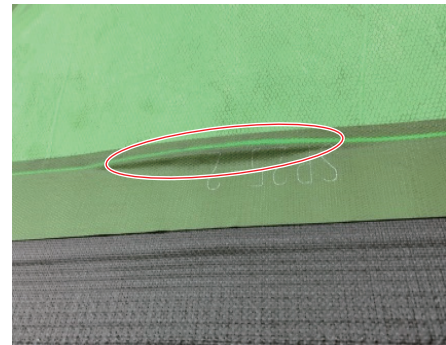


图 12 0.03 MPa 压实后蜂窝边缘配合状态
Fig. 12 0.03 MPa compacted honeycomb edge coordination state



图 13 0.095 MPa 压实后蜂窝边缘配合状态
Fig. 13 0.095 MPa compacted honeycomb edge coordination state

典型样件实验 4 中,使用外部压力 0.3 MPa 压实 70 mm 蜂窝,外部压力卸载后,蜂窝与铺层配合状态保持 1 h 后仍无回弹分层迹象。实验验证与模型分析均表明,0.3 MPa 压力可以使 70 mm 蜂窝对过渡斜率为 0.04 的局部铺层结构达到较好的配合效果。

刘志杰等^[25]在使用二次胶接工艺成型夹层结构过程中,针对蜂窝对丢层型面的配合情况进行了研究,结果表明,蜂窝底面按照面板丢层位置加工成阶梯状更有利于提高其板芯胶接质量。本工作对使用共固化工艺成型夹层结构中的蜂窝底面配合形式对整体胶接质量的影响进行了探讨,实验 3 至实验 6 样件经 0.3 MPa 压力固化后,外观质量无明显差异,统一采用 1 MHz 单频探头进行 C 扫描无损检测,通过外贴人工缺陷进行缺陷标定,蜂窝区检测阈值为 8 dB,检测结果如图 14 所示,以同

等结构、材料、工艺下,超声反馈值定性对比界面的胶接质量差异。

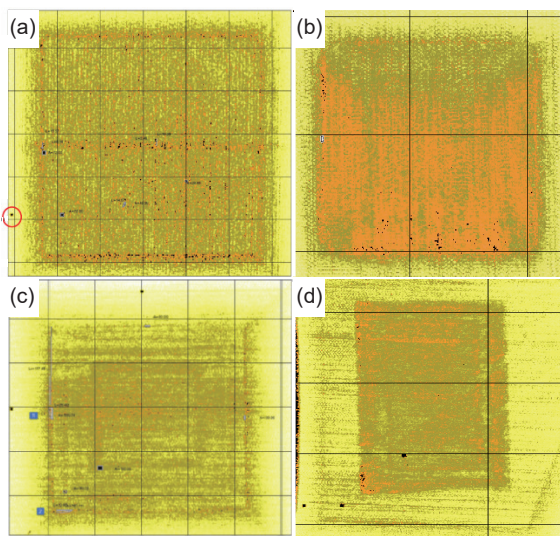


图 14 不同蜂窝配合状态的无损检测图像 (a)无加强层,蜂窝顶部最优区域平均值为 63.2 dB; (b)平面配合加强区,蜂窝顶部最优区域平均值为 56.5 dB; (c)斜面配合加强区,蜂窝顶部最优区域平均值为 61.8 dB; (d)阶梯配合加强区,蜂窝顶部最优区域平均值为 62 dB

Fig. 14 Nondestructive testing images of different honeycomb coordination states (a)No reinforcement layer, the average value of the top optimal area of the honeycomb is 63.2 dB; (b)planar fit reinforcement layer, average value of the top optimal area of the honeycomb is 56.5 dB; (c)bevel fit reinforcement layer, average value of the top optimal area of the honeycomb is 61.8 dB; (d)step fit reinforcement layer, average value of the top optimal area of the honeycomb is 62 dB

根据图 14 无损检测结果,单独考察每个样件,根据所选优区的均值,按照 8 dB 阈值评估,未发现存在超上限缺陷;将实验 5 与实验 6 的检测结果横向对比,可发现实验 5 的蜂窝底面斜面配合及实验 6 的蜂窝底面阶梯配合对胶接结果无明显影响,无损优区均值都在 62 dB 左右,且与实验 3 的对照组优区检测结果非常接近,但是实验 4 中,蜂窝底面为平面配合的样件无损检测结果表现出明显的衰减,差值在 6 dB 左右,其实际的胶接界面强度可能与对照组及让位铣切组之间存在差异。

对实验 4 样件进行破坏实验,未加工让位的蜂窝底面在局部铺层加强区的配合面过渡平顺,无结构破坏及屈曲变形,胶接界面配合紧密,基本与模型预测结果一致,胶接界面剥离破坏形式为内聚破坏,具体参见图 15。

分析原因为:在实验 4 样件中,外部施加在蜂窝上表面的固化压力,在向工装表面传递过程中,因为蜂窝下表面局部加强层的存在,使得一部分成型压力用于对抗蜂窝的变形回弹应力,蜂窝变形难

度越大,需要消耗的外部屈服压力越大,同样的,使到达蜂窝下表面的接触压力越小,而有效传递至蜂窝下表面的接触压力是确保胶接界面质量的根本前提。

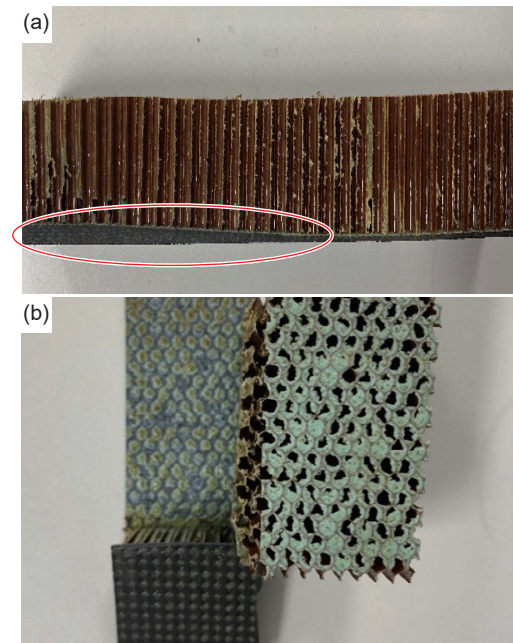


图 15 实验 4 样件的破坏实验状态 (a)粘接界面的截面状态; (b)粘接界面的剥离失效状态

Fig. 15 Failure experiment state of sample 4 (a)section state of adhesive interface; (b)peeling failure state of the adhesive interface

3 结论

(1)以挠度变形拟合为核心的芳纶蜂窝局部变形能力量化分析模型,对于局部蜂窝-铺层配合状态分析具有良好的适用性,该模型可用于指导蜂窝夹层结构设计过程的工艺性分析及工艺方案的理论验证,同时对其他形式的变形配合模型建立具有参考价值。

(2)蜂窝厚度是影响蜂窝变形能力的关键参数,尤其是在进行超厚尺寸蜂窝夹层结构设计过程中,对于局部加强铺层或丢层过渡铺层的设计时,需重点关注铺层过渡斜率的设计选取。

(3)对于超厚尺寸蜂窝,当铺层局部设计较复杂时,对蜂窝-铺层配合区进行让位铣切可有效改善两者的配合状态,而让位铣切的具体形式在共固化成型工艺中无实质性影响。

参考文献:

[1] 曾小苗, 邵俊欣, 刘秀芝. 复杂曲面零件变形问题研

- 究[J]. 纤维复合材料, 2022, 39(4): 44-47.
ZENG X M, SHAO J X, LIU X Z. Research on deformation of complex surface parts[J]. *Fiber Composites*, 2022, 39(4): 44-47.
- [2] 王燕, 程文礼, 王绍凯. 复合材料蜂窝夹层结构在民用飞机上的应用[J]. 纤维复合材料, 2021, 38(2): 73-77.
WANG Y, CHENG W L, WANG S K. Application of composite honeycomb sandwich structures in civil aircraft[J]. *Fiber Composites*, 2021, 38(2): 73-77.
- [3] 牛芳旭, 孙超明, 朱秀迪, 等. Nomex 蜂窝夹层结构飞机货舱地板的制备工艺及性能研究[J]. 纤维复合材料, 2020, 37(4): 102, 112-115.
NIU F X, SUN C M, ZHU X D, et al. Research on the preparation process and properties of Nomex honeycomb sandwich structure aircraft cargo floor[J]. *Fiber Composites*, 2020, 37(4): 102, 112-115.
- [4] 程文礼, 袁超, 邱启艳, 等. 航空用蜂窝夹层结构及制造工艺[J]. 航空制造技术, 2015(7): 94-98.
CHENG W L, YUAN C, QIU Q Y, et al. Aeronautical honeycomb sandwich structures and manufacturing processes[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015(7): 94-98.
- [5] CHEN S, MCGREGOR O P L, ENDRUWEIT A, et al. Simulation of the forming process for curved composite sandwich panels[J]. *International Journal of Material Forming*, 2020, 13: 967-980.
- [6] ZHAO Z, LIU C, SUN L, et al. Experimental and numerical study on the constrained bending-induced collapse of hexagonal honeycomb[J]. *Composite Structures*, 2021, 277: 114604.
- [7] CMH-17 Coordination Committee. Composite materials handbook: volume 6 - composite sandwich construction [M]. Wichita: SAE International, 2012.
- [8] 魏兆栋, 高仁璟, 刘书田, 等. 基于 Ω 形蜂窝的夹芯式大变形柔性蒙皮结构设计及性能分析[J]. 固体力学学报, 2022, 43(4): 419-433.
WEI Z D, GAO R J, LIU S T, et al. Design and performance analysis of large deformation flexible skin structure based on Ω -shaped honeycomb sandwich[J]. *Journal of Solid Mechanics*, 2022, 43(4): 419-433.
- [9] 王萌, 杨进军, 罗玉清, 等. 铃形柔性芳纶纸蜂窝成型方法研究[J]. 高科技纤维与应用, 2023, 48(5): 38-42.
WANG M, YANG J J, LUO Y Q, et al. Research on the formation method of bell-shaped flexible aramid honeycomb[J]. *High-Tech Fiber and Application*, 2023, 48(5): 38-42.
- [10] 张佩茹. 四角星形零泊松比蜂窝结构力学性能及其驱动方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
ZHANG P R. Research on the mechanical properties and driving method of the four-corner star-shaped zero Poisson ratio honeycomb structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [11] SPADONI A, RUZZENE M. Static aeroelastic response of chiral-core airfoils[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2016, 18(10): 1067-1075.
- [12] LIN H B, LIU H T. Mechanical properties and band gap characteristics of flexible based on multi-concave angle honeycomb[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 35: 100-105.
- [13] WANG S L, WANG H Q. Crushing behavior and deformation mechanism of randomly honeycomb cylindrical shell structure[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 151: 106739.
- [14] 王莹, 肖光明, 贺韡, 等. 大型双曲蜂窝夹层结构短舱成型工艺研究[J]. 复合材料科学与工程, 2021(7): 99-104.
WANG Y, XIAO G M, HE W, et al. Research on the forming process of large-scale hyperbolic honeycomb sandwich structure nacelle[J]. *Composite Materials Science and Engineering*, 2021(7): 99-104.
- [15] 刘顺臻, 李景钰, 姜洪博, 等. 曲率蜂窝夹层结构零件制造技术研究[J]. 纤维复合材料, 2021, 38(3): 36-40.
LIU S Z, LI J Y, JIANG H B, et al. Research on manufacturing technology of curvature honeycomb sandwich structural parts[J]. *Fiber Composites*, 2021, 38(3): 36-40.
- [16] 刘琦, 成艳娜, 徐小伟, 等. 大曲率蜂窝夹层结构制造过程蜂窝芯变形控制技术[J]. 复合材料科学与工程, 2023(8): 115-120.
LIU Q, CHENG Y N, XU X W, et al. Control technology for honeycomb core deformation in the manufacturing process of large curvature honeycomb sandwich structures[J]. *Composite Materials Science and Engineering*, 2023(8): 115-120.
- [17] 成艳娜, 刘训新, 李楠. 深 U 形蜂窝夹层结构整流罩制造技术研究[J]. 粘接, 2019, 40(5): 158-162.
CHENG Y N, LIU X X, LI N. Research on manufacturing technology of deep U-shaped honeycomb sandwich structure retroreflector[J]. *Adhesion*, 2019, 40(5): 158-162. (in Chinese).
- [18] 乔巧玲. 复合材料“U”型蜂窝夹层件制造技术研究[J]. 化工管理, 2018(14): 76-77.
QIAO Q L. Study on manufacturing technology of composite materials “U” type honeycomb sandwich parts[J]. *Chemical Industry Management*, 2018(14): 76-77.
- [19] LI Y J, ZHAO Z Y. A novel method to eliminate the bending-induced collapse of hexagonal honeycomb[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(10): 262-274.
- [20] 高飞宇. 四韧带反手性蜂窝的面外变形分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

- GAO F Y. Out-of-plane deformation analysis of four-ligament backhand honeycomb [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [21] 徐洋, 王皓辉, 盛晓伟, 等. 基于 Hyperworks 的六边形蜂窝板铺层等效建模方法研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(23): 45-51.
- XU Y, WANG H H, SHENG X W, et al. Research on equivalent modeling method of hexagonal honeycomb plate paving based on Hyperworks[J]. *Vibration and Shock*, 2018, 37(23): 45-51.
- [22] 周俊杰, 陈腾飞, 蔡海生. 蜂窝板有限元等效建模方法研究[J]. *机电工程技术*, 2022, 51(11): 64-67.
- ZHOU J J, CHEN T F, CAI H S. Research on finite element equivalent modeling method for honeycomb panels[J]. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2022, 51(11): 64-67.
- [23] 沈元星. 蜂窝曲面夹层结构发动机罩设计及优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- SHEN Y X. Design and optimization of honeycomb surface sandwich structure engine hood [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [24] SEEMANN R, KRAUSE D. Numerical modelling of Nomex honeycomb sandwich cores at meso-scale level[J]. *Composites Structures*, 2017, 159: 702-718.
- [25] 刘志杰, 张艳芳, 刘安黎, 等. 配合间隙对蜂窝夹层结构板芯胶接质量的影响和研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(5): 104-109.
- LIU Z J, ZHANG Y F, LIU A L, et al. Effect of fit clearance on the bonding quality of honeycomb sandwich structural panels[J]. *Composite Materials Science and Engineering*, 2021(5): 104-109.

收稿日期: 2024-01-23; 录用日期: 2024-03-05

基金项目: 2023 年度连云港市市级科技计划项目(CG2309)

通讯作者: 卢政斌(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为复合材料制造技术, 联系地址: 连云港市高新区振华东路 17 号中复连众科研大楼(222000), E-mail: 531865118@qq.com

(本文责编: 张 琴)